

# PSCAD/EMTDC를 이용한 철도고압배전계통의 과도특성 해석 및 1선 지락사고에 대한 보호방안

(Analysis of Transient Characteristic in the Railway High Voltage Distribution Lines Using PSCAD/EMTDC & Method of Protection for One Line Ground Fault)

박계인\* · 창상훈 · 최창규

(Kye-In Park · Sang-Hoon Chang · Chang-Kyu Choi)

## 요 약

철도에서의 고압배전선로는 역사조명 및 동력설비, 그리고 열차의 안전운행을 위한 신호설비의 전력을 공급해주는 설비로 열차의 안전운행 및 철도 이용자의 서비스 향상을 위한 중요한 역할을 담당하고 있다. 또한 각종 전력기기의 전자화, 자동화로 인해 양질의 전력공급이 요구되며, 철도 이용자에 대한 보다 향상된 서비스를 제공과 역사내 전기에너지 사용의 급증으로 인한 전력공급의 신뢰성 확보가 요구된다.

본 논문에서는 철도고압배전계통의 고장현상을 분석하기 위하여 철도고압배전 설비중 접지계통과 비접지계통에 대해서 사고시 전압강하가 발생 여부와 사고를 제거하기 위해 차단기를 동작시켰을 때의 서지전압에 의한 과도특성을 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모의하였으며, 이 사고모의 결과를 토대로 비접지 고압배전계통의 보호방법에 대한 대안을 제시하였다.

## Abstract

High quality power supplying of high voltage distribution lines electric railway system is the important function. high voltage distribution system is complicated witch is compose with distribution line, circuit break, protection facilities and so on. Among this components, role of substation is most important for elevation of reliability in electric power system. Therefore, the enhanced reliability considering the preventive inspection, repair work, replacement is necessary.

This paper proposes protection method in railway high voltage distribution lines. we model distribution system using PSCAD/EMTDC(Power System Computer Aided Design/Electro Magnetic Transients DC Analysis Program) and extract various fault data. In conclusion this methods can protection of ground fault.

Key Words : Electric Railway System, Protection Facilities, Circuit Break, Ground Fault, Transient

\* 주저자 : 인천광역시 상수도사업본부 소장  
Tel : 032-330-2222, Fax : 032-330-8402

E-mail : pkil1197@hanmail.net

접수일자 : 2007년 8월 8일

1차심사 : 2007년 8월 16일, 2차심사 : 2007년 11월 9일

심사완료 : 2007년 11월 21일

## 1. 서론

고압배전 계통은 신호전원과 역사조명 및 동력, 전자계산기 설비 등에 전원을 공급해 주는 것으로 이 설비는 열차운행과 서비스 향상 측면에서 매우 중요한 역할을 담당하고 있다.

따라서 전차선로의 급전계통과 마찬가지로 고압 배전계통의 보호에 대한 신뢰성 확보도 중요한 문제로 부각되고 있다. 그러나 고압 배전계통의 보호는 (i) 교류전차선 전압으로부터 정전유도를 방지해야 하며, (ii) 고압배전선 단선 등에 의한 전차선과의 혼촉시에 보호를 용이하게 하는 보호설비를 구성해야 하는 등 일반 전력계통과는 특이한 형태의 보호방식을 필요로 하여 철도 고압배전계통의 특성에 부합하는 최적의 보호계전 알고리즘의 개발이 시급한 실정이다.

철도고압배전계통의 특징은 교류급전계통의 1선 직접접지 계통에 비해서 비접지 계통 또는 중성점 저항접지 계통으로 가장 많이 발생하는 1선 지락고장에 대해서는 고장전류가 작고 보호검출이 어려운 면이 있다. 또한 비접지 계통의 경우 배전선로의 대지에 대한 커패시턴스가 존재하고 있기 때문에 보호가 상당히 어려워진다.

비접지 계통에 있어서의 1선 지락보호에는 미소전류까지 검출할 수 있는 지락방향계전기 등이 개발되고 섬세하고 민감(delicate)한 보호방식을 적용하고 있기 때문에 때로는 계전기의 불필요한 동작을 초래하여 계통운용에 혼란을 가져오는 경우가 있다[1].

본 논문에서는 철도 고압배전계통의 보호특성을 분석하고 비접지계통과 중성점 접지계통에 대하여 1선 지락시의 고장현상을 검토하여 이를 토대로 비접지 계통 고압배전선로의 보호방안을 제시하고자 한다.

## 2. 철도 고압배전계통 보호특성

철도고압배전계통의 특징은 교류급전계통의 1선 직접접지 계통에 비해서 비접지 계통 또는 중성점 저항접지 계통이다. 따라서 가장 많이 발생하는 1선 지락고장에 대해서는 고장전류가 작고 보호검출이 어려운 면에 있다. 또한 비접지 계통의 경우 배전선

로의 대지에 대한 커패시턴스가 존재하고 있기 때문에 보호가 상당히 어려워진다.

비접지 계통에 있어서의 1선 지락보호에는 미소전류까지 검출할 수 있는 지락방향계전기 등이 개발되고 섬세하고 민감한 보호방식을 적용하고 있기 때문에 때로는 계전기의 불필요한 동작을 초래하여 계통 운용에 혼란을 가져오는 경우가 있다. 본 장에서는 비접지계통과 접지계통에서의 보호방식에 대해 검토한다.

### 2.1 비접지계통의 보호

비접지계통에서의 지락전류는 선로충전전류 뿐이므로 지락과전류계전기(OCGR)로는 검출이 불가능하기 때문에 영상CT(ZCT)와 GPT를 결합한 선택지락계전기(SGR)를 사용한다.

이는 사고시 영상전압과 영상전류의 적으로 동작하는 전력형 방향계전기이며, 사고회선을 선택 차단한다. 그림 1과 같이 GPT의 3차를 open delta 결선하고 제한저항 R을 삽입하며 계전기 동작 유효 전류를 흘리고 제3고조파를 억제하는 효과가 있다. 고압 배전선 1선지락시의 고장전류와 영상전압의 크기는 정상, 역상임피던스와 선로의 누설저항( $r$ )은 무시할 수 있을 정도이므로 그림 2의 등가회로에서 계산할 수 있다[2].

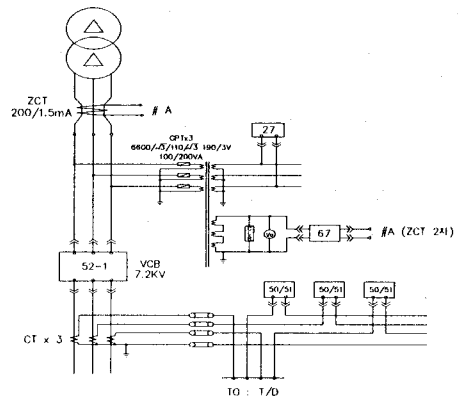
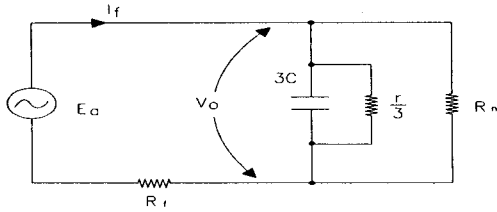


그림 1. 비접지계통의 보호 구성도  
Fig. 1. Block diagram of protection in the non grounding system



Rn : 제한저항의 1차환산치

그림 2. 비접지 고압배전계통 등가회로  
Fig. 2. Equivalent Circuit of non ground high voltage distribution lines in electric railway system

$$R_n = \left(\frac{n}{3}\right)^2 \cdot R_1$$

여기서 C : 선로의 총충용량(1선당)

Rf : 고장점 저항

Ea : 상전압

n : GPT(접지변압기)의 변성비를 나타낸다.

위 그림에서 고장전류 I\_f는

$$I_f = \frac{E}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{R_f + \frac{1}{\frac{1}{R_n} + \beta\omega C}}$$

$$= \frac{E}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{R_f + \frac{1}{\frac{9}{n^2 R_1} + \beta\omega C}} \quad (1)$$

가 되며, 영상전압 V\_o는

$$V_o = \frac{E}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\frac{1}{R_n} + \beta\omega C}{R_f + \frac{1}{\frac{1}{R_n} + \beta\omega C}}$$

$$= \frac{E}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{1 + R_f \left(\frac{9}{n^2 R_1} + \beta\omega C\right)} \quad (2)$$

가 된다.

## 2.2 접지계통의 보호

접지방식에는 직접접지방식, 저항접지방식, 소호

리액터 접지방식이 있다. 철도 고압배전계통은 Δ결선을 이용한 전력공급방식이므로 변압기의 중성점은 저항을 통하여 접지하여 고장전류를 제한하는 방식을 적용하고 있으며, 일반적으로 100~200[A]의 고장전류이면 보호계전기가 충분히 동작한다. 그림 3은 저항접지방식의 보호계통 결선도를 나타낸 것이며, 이때의 1선지락 현상은 그림 4와 같다[3-6].

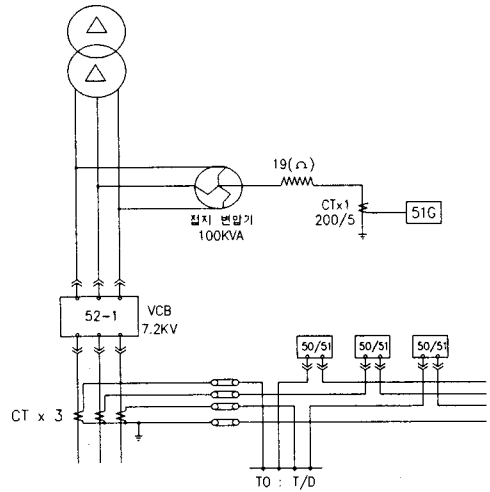


그림 3. 저항접지계통의 보호계통 결선도  
Fig. 3. Block diagram of protection in the resistance grounding system

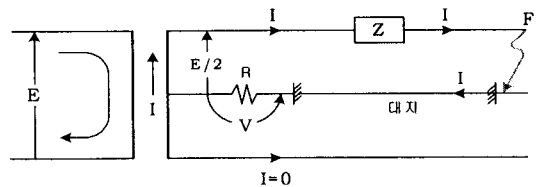


그림 4. 저항접지계통의 1선지락 현상  
Fig. 4. Phenomena of one line ground fault in the resistance grounding system

## 3. 접지방식별 고압배전계통 1선 지락시 과도특성 해석

### 3.1 모델링

철도고압배전 설비중 접지계통과 비접지계통에

PSCAD/EMTDC를 이용한 철도고압배전계통의 과도특성 해석 및 1선 지락사고에 대한 보호방안

대해서 사고시 전압강하가 발생 여부와 사고를 제거하기 위해 차단기를 동작시켰을 때의 서지전압에 의한 과도특성을 알아보기자 PSCAD/ EMTDC를 이용하여 시뮬레이션을 하였다. 접지계통과 비접지계통 모델링은 그림 5, 6과 같으며 저항접지계통인 경우 중성점접지 저항을 200[Ω]으로 하였다.

그림 5는 6.6[kV]와 22.9[kV]계통의 접지방식인 것이며, 그림 6은 6.6[kV]와 22.9[kV]계통의 비접지방식을 모델링한 것이다.

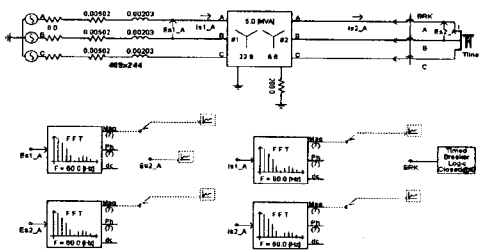


그림 5. 해석모델(접지계통)  
Fig. 5. Analysis Model(grounding system)

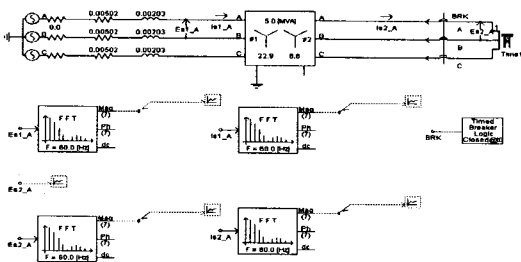


그림 6. 해석모델(비접지계통)  
Fig. 6. Analysis Model(non grounding system)

3.2 사고모의 해석

시뮬레이션 조건은 0.2초에 지락사고가 발생하고, 사고 발생 0.2초 후에 차단기가 동작하는 것으로 모의하였다. 그림 7~10은 접지방식별/배전전압별 고압배전계통에 대한 사고모의 결과를 나타낸 것이다.

시뮬레이션 조건으로 고압 배전선로 사용전선은 고압용 ACSR-OC 95[mm]로 하였으며, 전체 계통 거리는 12[km], 역과 역간 거리는 6[km]로 가정하여 해석하였다. 그리고 역당 최대부하는 34[kW], 역당 평균 부하는 10.9[kW](철도 배전계통 부하율 32[%

적용)로 하였다.

고장 모의 결과를 표 1에 정리하였다. 접지계통과 비접지계통의 시뮬레이션 결과를 분석해 보면, 사고가 발생하였을 때 접지계통은 전압강하가 일어나 사고가 발생했음을 알 수 있지만, 비접지 계통은 사고임에도 불구하고 전력을 강제로 송전하여 전압강하가 발생하지 않아 사고를 판단하기 곤란하다.

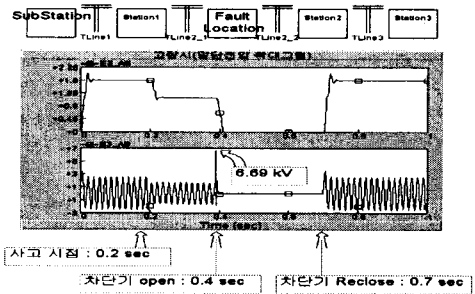


그림 7. 6.6(kV) 접지계통 사고해석  
Fig. 7. Fault analysis of 6.6(kV) groundingsystem

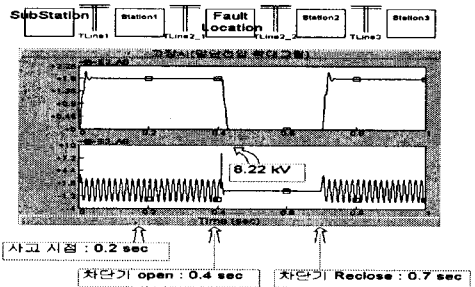


그림 8. 6.6(kV) 비접지계통 사고해석  
Fig. 8. Fault analysis of 6.6(kV) non grounding system

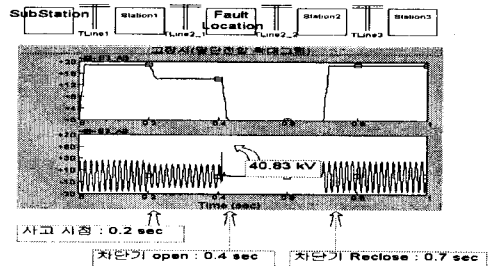


그림 9. 22.9(kV) 접지계통 사고해석  
Fig. 9. Fault analysis of 22.9(kV) grounding system

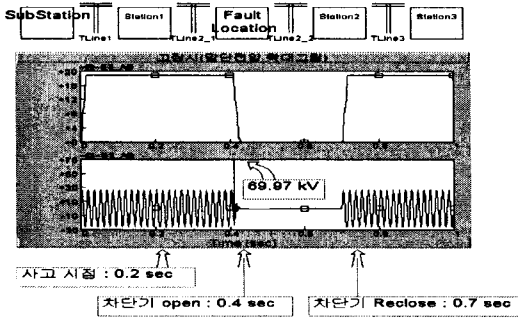


그림 10. 22.9(kV) 비접지계통 사고분석  
Fig. 10. Fault analysis of 22.9(kV) non grounding system

그리고 차단기 동작시 서지전압을 분석해 보면, 접지계통에 비해 비접지계통의 과도전압이 높음을 알 수 있다. 비접지계통이 접지계통보다 과도전압 상승률이 높게 나타난 이유는 선로내의 캐패시터에 의한 진행파에 기인한다. 결국 비접지계통은 사고 발생시 보호차단이 곤란하며, 사고시 과도특성으로 인한 2차적인 피해가 우려되므로 보호측면에서 직접 접지 또는 간접접지(저항접지)방식의 도입을 적극적으로 검토할 필요가 있다.

표 1. 배전전압별 과도전압 특성  
Table 1. Transient voltage of high voltage distribution lines in electric railway system

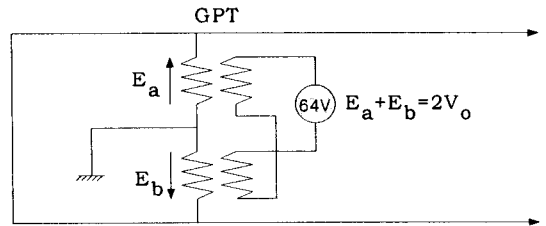
전압레벨[kV]	구 분	과도전압[kV]
6.6	접지 계통	6.69
	비접지 계통	8.22
22.9	접지 계통	40.83
	비접지 계통	69.97

#### 4. 고압배전계통 보호방안

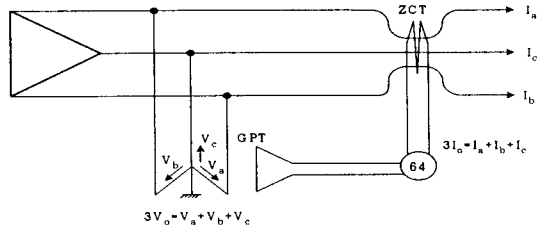
3장에서 고장모의 결과, 비접지방식 고압배전계통은 사고발생시 계통보호를 위한 방안이 필요한 것으로 분석되었다. 본 장에서는 고압배전계통의 1선 지락사고시 보호방안에 대하여 검토하고 그 결과를 제시하였다.

#### 4.1 비접지계통

그림 11은 비접지 계통에 있어서의 1선 지락시, 보호방식으로서 영상전압, 영상전류를 이용하는 방식의 결선도를 나타낸 것이다. GPT(접지형 변압기)에 의해 각 상의 대지간 전압의 합을 만들면 영상전압  $V_0$ 에 비례한 값을 얻을 수 있다. 또한 3상계통의 경우에는 ZCT(영상변류기)에 의해 각 상 전류의 합을 만들어, 영상전류  $I_0$ 에 비례한 값을 얻고, 동일 모선에서 다 회선에 분기하여 배전할 때에는 지락 회선을 영상전압  $V_0$  과 영상전류  $I_0$  의 절대값과 벡터방향을 보고 검출하는 지락방향계전기(64)를 사용하여 지락회선의 한정보호를 실시하는 방안이다.



(a) 접지검출보호(단상계통)  
(a) Protection of ground detect(1φ)



(b) 지락방향계전기(3상계통)  
(b) Grounding relay(3φ)

그림 11. 비접지계통 배전선로의 1선지락 보호  
Fig. 11. Protection of one line ground fault in the non grounding system

#### 4.2 저항접지계통

그림 12는 저항접지계통에 있어서의 1선 지락보호 방식을 나타내는 것으로 이 방식은 부하전류와 고장 전류의 경로가 다르기 때문에 고장선택은 비교적 간

PSCAD/EMTDC를 이용한 철도고압배전계통의 과도특성 해석 및 1선 지락사고에 대한 보호방안

단하다. 우선 부하전류 ( $I'$ )은 a상에서 출발하여 부하를 통하여 b상에서 돌아온다. 그 전류는 값이 같고 방향은 반대가 된다.

또한 1선 지락의 고장전류는 a상 고장인 경우, a상에서 흐르기 시작하여 고장점 F에서  $r_g$ 를 통하여 지하로 누설되어 변전소의 중성점 저항 R을 통하여 되돌아오기 때문에 b상을 통하지 않는다. 따라서 1선 지락전류는 a상과 b상의 전류에 불평형을 일으키게 된다. 이 때문에 변전소에서는 a상측과 b상측에 CT를 삽입하여, 그 전류차를 계전기 ( $64_1$ )에 입력하여 고장을 검출한다. ( $64_1$ )에 흐르는 전류는 부하전류를 포함하지 않기 때문에 고정밀도로 정정을 할 수 있고, 고저항 접지고장까지 검출할 수 있다. 또한, 중성점 저항 R의 단자 사이에 6.6[kV]/110[V] 정격 PT를 삽입하고, 그 2차 출력을 ( $64_2$ )에 입력하여 이 전압이 발생한 경우(R에 접지전류가 흐른다) 지락고장을 검출하는 방식이다.

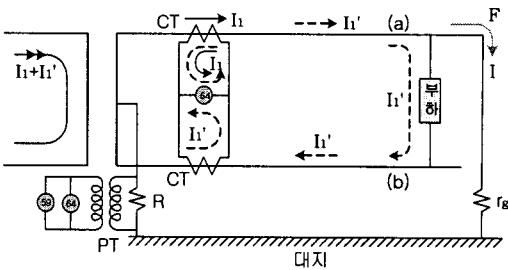


그림 12. 저항접지를 이용한 1선 지락보호방식  
Fig. 12. Protection system of one line groundfault using resistance ground

5. 결 론

철도배전방식의 비접지계통은 지락사고 발생시 고장 판별이 어려워 보호차단이 곤란하며, 사고시 과도특성으로 인한 2차적인 피해가 우려되므로 보호 측면에서 직접접지 또는 간접접지(저항접지, 200[Ω]) 방식의 적용이 필요한 것으로 분석되었다.

- 시뮬레이션 결과, 6.6[kV] 계통의 경우 저항접지 방식의 과도전압은 6.69[kV], 비접지 방식의 과도전압은 8.22[kV]로 비접지 방식의 과도전압이 약 20[%] 증가하는 것으로 분석되었다.

- 고압배전계통의 접지는 전차선 전압에서의 정전유도를 피하고 전차선과 고압배전선과의 혼촉시 보호에 적합한 방식이다.
- 저항접지방식은 변전소의 배전용 변압기 2차측 중성점을 저항기(200[Ω])를 통하여 접지하므로써 지락고장을 검출하도록 한다(그림 12).

본 논문에서 제시한 철도고압 수전변전소의 접지 변압기와 중성점 접지저항을 설치하는 방안은 철도 고압배전계통의 보호에 유용하게 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- (1) S.H. Chang, H.M. Lee et al "Optimization of Protection System and Development of Diagnosis on the Electric Railway Equipment" pp.146~177, 2002. 3.
- (2) "Protection of industrial and commercial electric power distribution system", Wisconsin University, 2003. 4.
- (3) "電氣概論 電燈電力シリーズ4, 配電線路設備", (社)日本鐵道電氣技術協會, 1992.
- (4) "A review of impedance-based fault locating experience", Iowa-Nebraska system protection seminar, October 1990.
- (5) 신대승, "보호계전 시스템 기술" 기다리, pp.239~243, 1993.
- (6) 日本電氣學會, "交流電氣鐵道における保護技術", 電氣學會技術報告 610號, pp.36~37, 1996. 10.

◇ 저자소개 ◇

박계인 (朴桂仁)

1954년 8월 4일생. 1999년 2월 서울산업대학교 전기공학과 졸업(학사). 2001년 2월 인하대학교 산업대학원 전기공학과 졸업(석사). 2005년 서울산업대학교 철도전문대학원 박사과정 수료. 2008년 2월 현재 인천광역시 상수도사업본부 부평정수사업소 소장.  
E-mail : pki1197@hanmail.net

장상훈 (倉相勳)

1961년 3월 28일생. 1992~1994년 철도청 기술연구소 연구원. 1994년~현재 한국철도기술연구원 수석연구원(철도시험인증연구센터장). 2002년 홍익대학교 대학원 전기정보제어공학과 졸업(박사). 2004년 고려대학교 차세대전력연구원센터 객원연구원.  
E-mail : shchang@krii.re.kr

최창규 (崔昌圭)

1953년 2월 25일생. 1987년 8월 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 서울산업대학교 전기공학과 교수.